

## BAB II

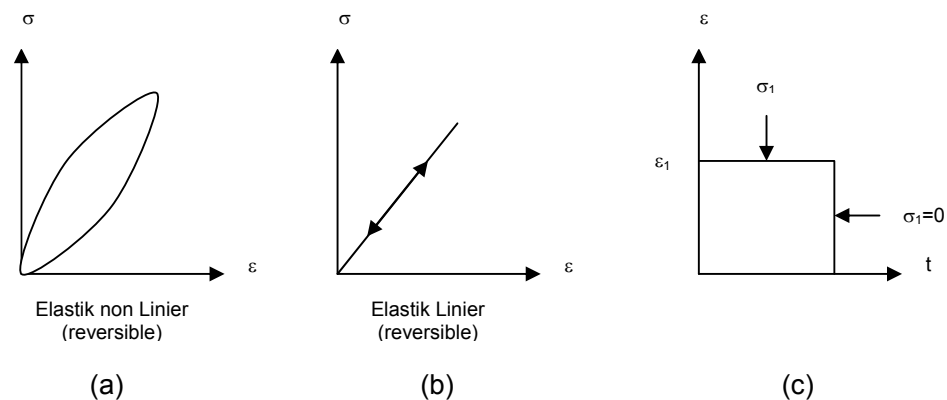
### DASAR TEORI

#### 2.1 Perilaku Batuan

Batuan mempunyai perilaku yang berbeda-beda pada saat menerima beban. Perilaku ini dapat ditentukan dengan pengujian di laboratorium yaitu dengan pengujian kuat tekan.

##### 2.1.1 Elastik

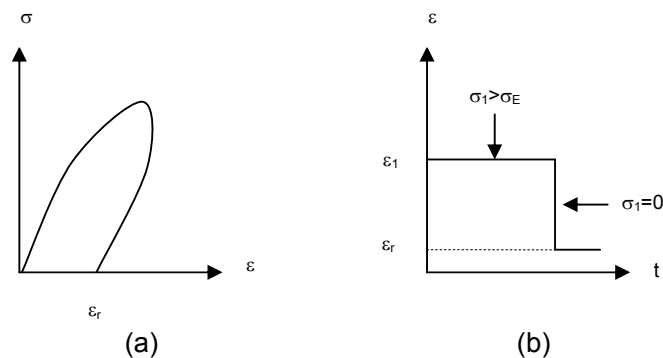
Batuan dikatakan berperilaku elastik apabila tidak ada deformasi permanen pada saat tegangan dihilangkan (dibuat nol). Dari kurva tegangan-regangan hasil pengujian kuat tekan terdapat dua macam sifat elastik, yaitu elastik linier dan elastik non linier.



**Gambar 2.1 : (a,b) Kurva tegangan-regangan, (c) Kurva regangan-waktu untuk perilaku elastik linier dan elastik non linier**

### 2.1.2 Elasto Plastik

Perilaku plastik batuan dapat dicirikan dengan adanya deformasi (regangan) permanen yang besar sebelum batuan runtuh atau hancur (failure).



**Gambar 2.2 : (a) Kurva tegangan-regangan dan (b) Kurva regangan-waktu untuk perilaku batuan elasto plastik**

## 2.2 Sifat Fisik dan Sifat Mekanik Batuan

Batuan mempunyai sifat-sifat tertentu yang dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu :

1. Sifat fisik batuan, seperti : berat isi, *specific gravity*, porositas, *void ratio*, kadar air dan derajat kejenuhan.
2. Sifat mekanik batuan, seperti : kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas dan rasio Poisson.

Kedua jenis sifat batuan dapat dilakukan baik dilaboratorium maupun dilapangan.

### 2.2.1 Pembuatan Percontoh atau Sampel Batuan

Pembuatan percontoh dapat dilakukan dengan dua cara, yang pertama dilaboratorium dilakukan dari blok batu yang diambil dilapangan kemudian dibor dengan penginti laboratorium untuk mendapatkan percontoh berbentuk silinder dengan diameter 50-70 mm dan tingginya dua kali diameternya. Sedangkan cara kedua dilakukan dengan pemboran inti langsung kedalam batuan yang akan diselidiki dilapangan.

### 2.2.2 Penentuan Sifat Fisik Batuan

#### □ Penimbangan Berat Percontoh

|             |   |
|-------------|---|
| $W_n$       | = berat percontoh asli / natural (gram)   |
| $W_o$       | = berat percontoh kering (gram)   |
| $W_w$       | = berat percontoh jenuh (gram)  |
| $W_a$       | = berat percontoh jenuh + berat air + berat bejana (gram)                         |
| $W_b$       | = berat percontoh jenuh tergantung di dalam air + berat air + berat bejana (gram) |
| $W_s$       | = berat percontoh jenuh didalam air ( $W_a - W_b$ )                               |
| $W_o - W_s$ | = volume percontoh tanpa pori-pori ( $\text{cm}^3$ )                              |
| $W_w - W_s$ | = volume percontoh total ( $\text{cm}^3$ )  |

#### □ Penentuan Sifat Fisik Batuan

$$\text{Berat isi asli (natural density), } \gamma = \frac{W_n}{W_w - W_s} (\text{gram} / \text{cm}^3) \dots\dots\dots 2.1$$

$$\text{Berat isi kering (dry density), } \gamma_d = \frac{W_o}{W_w - W_s} (\text{gram} / \text{cm}^3) \dots\dots\dots 2.2$$

$$\text{Berat isi jenuh (saturated density), } \gamma_s = \frac{W_s}{W_w - W_s} (\text{gram / cm}^3) \dots 2.3$$

$$\text{Specific gravity, GS} = \frac{\frac{W_o}{W_o - W_s}}{\text{Berat isi air}} (\text{gram / cm}^3) \dots 2.4$$

$$\text{Kadar air (water content), } w = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\% \quad (\%) \dots 2.5$$

$$\text{Derajat kejenuhan, SR} = \frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100\% \quad (\%) \dots 2.6$$

$$\text{Porositas, } n = \frac{W_n - W_o}{W_w - W_s} \times 100\% \quad (\%) \dots 2.7$$

$$\text{Void ratio, } e = \frac{n}{1 - n} \dots 2.8$$

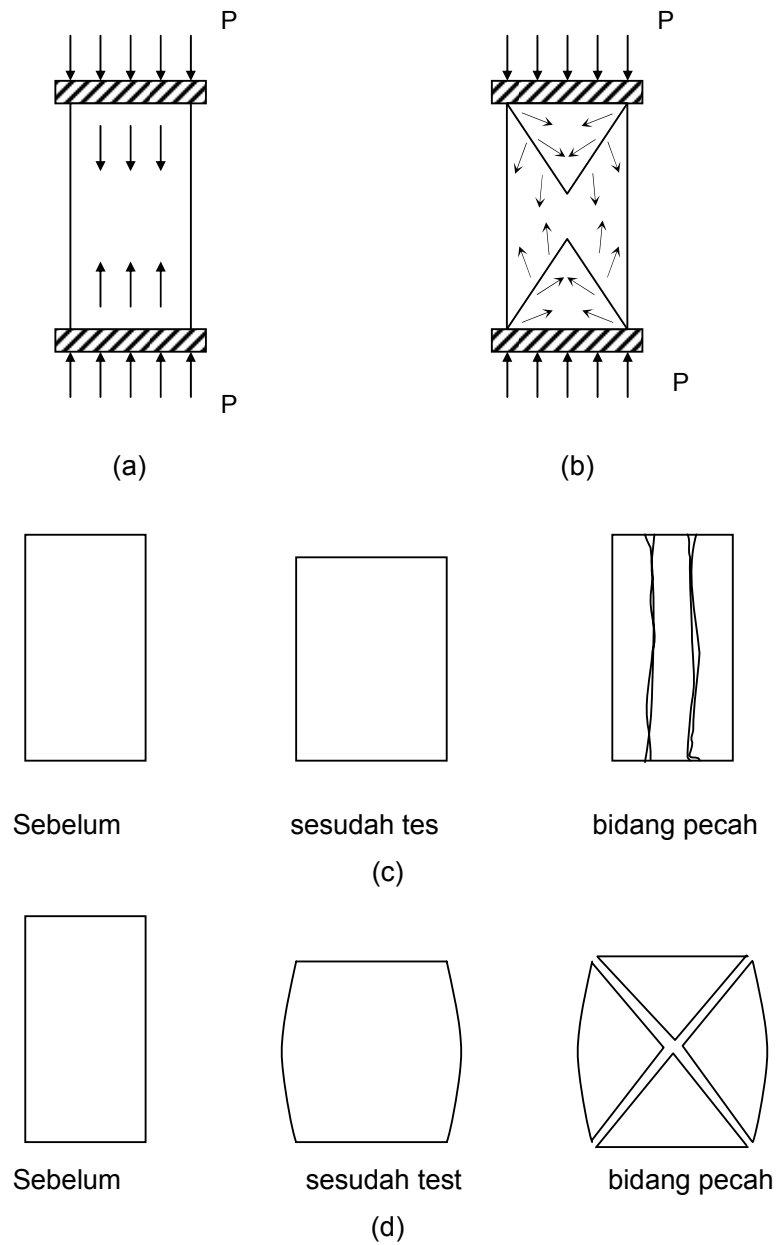
### 2.2.3 Penentuan Sifat Mekanik Batuan

Pengujian untuk menentukan sifat mekanik batuan dapat dilakukan diantaranya dengan pengujian dibawah ini :

#### □ Pengujian Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compressive Strength)

Pengujian ini menggunakan mesin tekan untuk menekan percontoh batu yang berbentuk silinder, balok atau prisma dari satu arah (uniaksial).

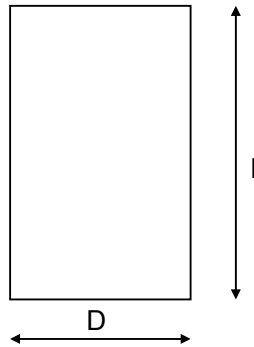
Perbandingan antara tinggi dan fiameter percontoh (I/D) mempengaruhi nilai kuat tekan batuan. Untuk perbandingan I/D = 1 kondisi tegangan triaksial saling bertemu sehingga akan memperbesar nilai kuat tekan batuan untuk pengujian kuat tekan digunakan  $2 < I/D < 2,5$ . Makin besar I/D maka kuat tekan akan bertambah kecil



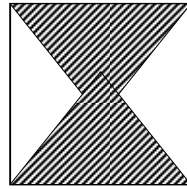
**Gambar 2.3 : Penyebaran tegangan didalam percontoh batu (a) teoritis dan (b) eksperimental, (c) Bentuk pecahan teoritis dan (d) Bentuk pecahan eksperimental**

Ukuran percontoh

$$2 \leq l/D \leq 2,5$$

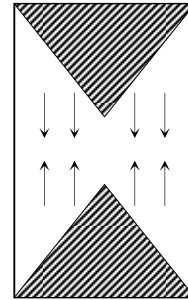


$$l/D = 1$$



(a)

$$l/D = 2$$



Kondisi Uniaksial

(b)

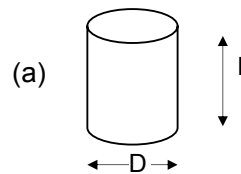


Kondisi triaksial (tegangan)

**Gambar 2.4 : Kodisi tegangan didalam percontoh untuk  $l/D$  berbeda  
(a)  $l/D = 1$  (b)  $l/D = 2$**

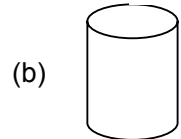
Sebelum pengujian

sesudah pengujian



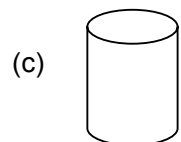
(a)

$$\text{Regangan aksial, } \varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l}$$



(b)

$$\text{Regangan lateral, } \varepsilon_l = \frac{\Delta D}{D}$$



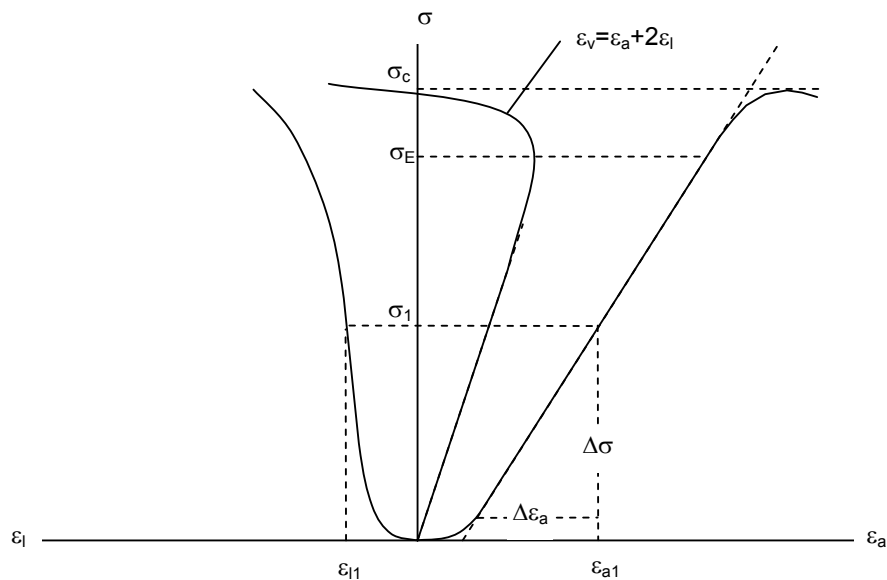
(c)

$$\text{Regangan volumik, } \varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_l$$

**Gambar 2.5 : Regangan yang dihasilkan dari pengujian kuat tekan batuan  
(a) regangan aksial, (b) regangan lateral dan (c) regangan volumik**

Perpindahan dari percontoh batuan baik aksial ( $\Delta l$ ) maupun lateral ( $\Delta D$ ) selama pengujian diukur dengan menggunakan *dial gauge* atau *electric strain gauge*. Dari hasil pengujian kuat tekan, dapat digambarkan kurva tegangan-regangan (stress-strain) untuk tiap percontoh batu, kemudian dari kurva ini dapat ditentukan sifat mekanik batuan :

1. Kuat tekan  $\sigma_c$
2. Batas Elastik  $\sigma_E$
3. Modulus Young  $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \dots\dots\dots(2.9)$
4. Poisson's Ratio  $\nu = \frac{\varepsilon_{l1}}{\varepsilon_{a1}} \dots\dots\dots(2.10)$



$\varepsilon_a$  = regangan aksial  
 $\varepsilon_l$  = regangan lateral  
 $\varepsilon_v$  = regangan volumik

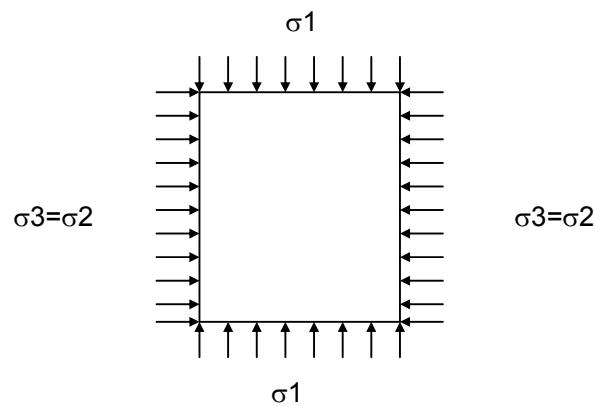
**Gambar 2.6 : Kurva tegangan-regangan hasil pengujian kuat tekan batuan**

### □ Pengujian Triaksial

Pengujian ini adalah salah satu pengujian yang terpenting dalam mekanika batuan untuk menentukan kekuatan batuan di bawah tekanan triaksial. Percontoh yang digunakan berbentuk silinder dengan syarat-syarat sama pada pengujian kuat tekan.

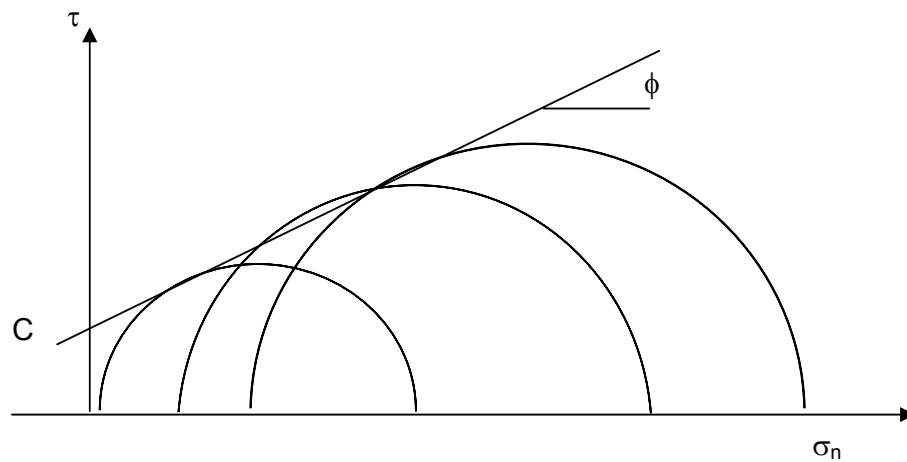
Dari hasil pengujian triaksial dapat ditentukan :

- *Strength envelope* (kurva *intrinsic*) atau selubung kekuatan
- Kuat geser atau *shear strength*
- Sudut geser dalam,  $\phi$
- Kohesi,  $C$



**Gambar 2.7 : Kondisi tegangan pada pengujian triaksial**

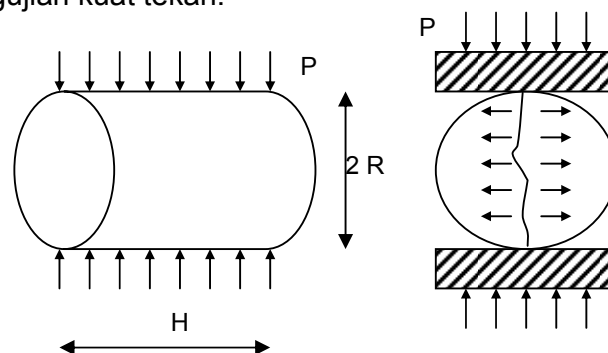




**Gambar 2.8 : Lingkaran Mohr dan kurva instrinsik hasil pengujian triaksial**

□ **Pengujian Kuat Tarik-Uji Brazilia (Indirect Tensile Strength Test)**

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tarik (tensile strength) dari percontoh batu berbentuk silinder secara tidak langsung. Alat yang digunakan adalah mesin tekan seperti pada pengujian kuat tekan.



**Gambar 2.9 : Pengujian Kuat Tarik**

$$\text{Kuat Tarik : } \sigma_t = \frac{P}{\pi R H} \dots\dots\dots(2.11)$$

## 2.3 Kriteria Keruntuhan Batuan

Kriteria keruntuhan batuan ditentukan dengan asumsi regangan bidang (*plane strain*) atau tegangan bidang (*plane stress*) agar perhitungan menjadi sederhana.

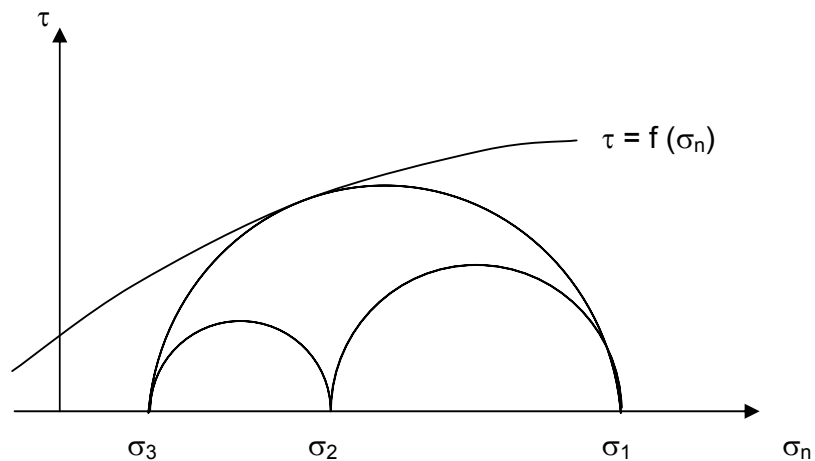
### 2.3.1 Kriteria Mohr

Teori Mohr menganggap bahwa untuk suatu keadaan tegangan  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ,  $\sigma_2$  (*intermediate stress*) tidak mempengaruhi keruntuhan batuan dan kuat tarik tidak sama dengan kuat tekan.

Kriteria ini dapat ditulis :

$$\tau = f(\sigma) \dots\dots\dots 2.12$$

dan dapat digambarkan pada  $(\sigma, \tau)$  oleh sebuah kurva pada Gambar 2.10



**Gambar 2.10 : Kriteria Mohr :  $\tau = f(\sigma)$**

Keruntuhan (*failure*) terjadi jika lingkaran Mohr Menyinggung kurva Mohr (kurva intrinsik) dan lingkaran tersebut disebut 'lingkaran keruntuhan'. Kurva Mohr merupakan selubung keruntuhan dari lingkaran-lingkaran Mohr saat keruntuhan.

### 2.3.2 Kriteria Mohr – Coulomb

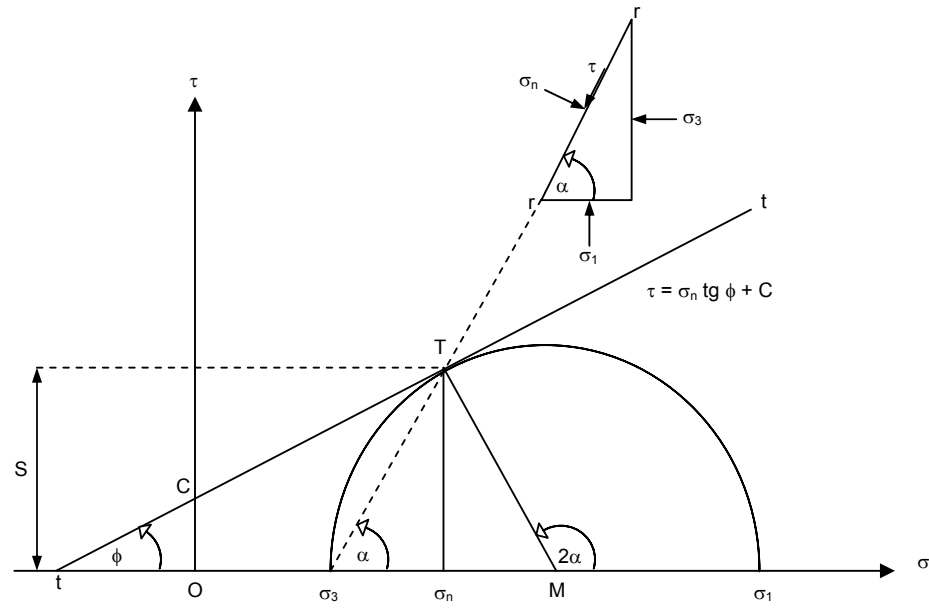
Pada kriteria Mohr-Coulomb selubung keruntuhan dianggap sebagai garis lurus untuk mempermudah perhitungan. Kriteria ini didefinisikan sebagai berikut :

$$\tau = C + \mu \sigma \dots\dots\dots 2.13$$

dimana :

- $\tau$  = tegangan geser
- $C$  = kohesi
- $\sigma$  = tegangan normal
- $\mu$  = koefisien geser dalam batuan =  $\tan \phi$

Faktor keamanan ditentukan berdasarkan jarak dari titik pusat lingkaran Mohr ke garis kekuatan batuan (kurva intrinsik) dibagi dengan jari-jari lingkaran Mohr. Faktor keamanan ini menyatakan perbandingan keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut.



Keterangan gambar :

$r - r$  = bidang *rupture*

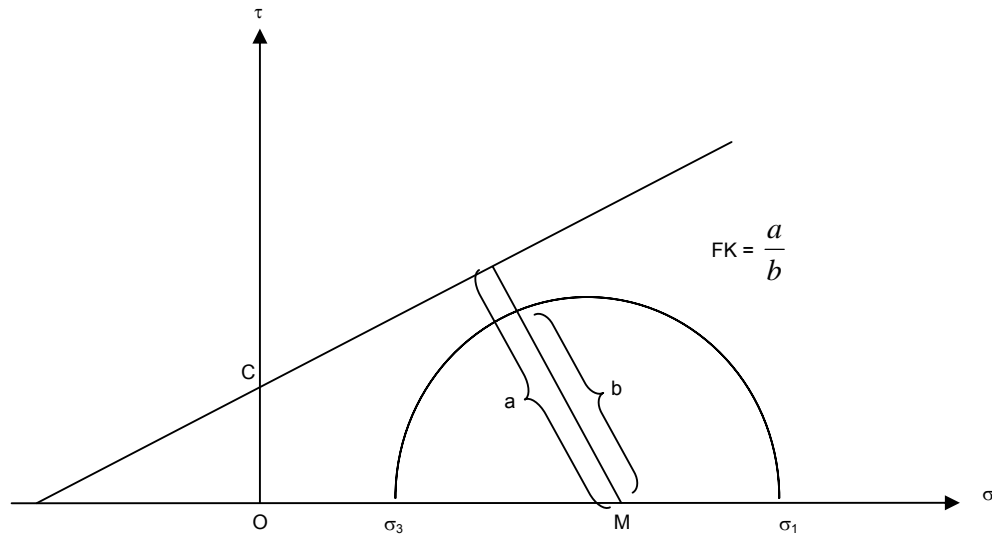
$t - t$  = Garis kuat geser Coulomb

$\sigma_1 - \sigma_3$  = diameter lingkaran Mohr

*Normal stress* pada bidang rupture ( $r - r$ ) :  $\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$

*Shear stress* pada bidang rupture ( $r - r$ ) :  $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$

**Gambar 2.11 : Kriteria keruntuhan Mohr – Coulomb**



**Gambar 2.12 : Penentuan Faktor Keamanan**

$$\text{Faktor keamanan} = \frac{a}{b} = \frac{\left[ \frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right] \sin \phi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}} \dots\dots\dots 2.14$$

dimana :

$$a = \left[ \frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right] \sin \phi$$

$$b = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

### 2.3.3 Kriteria Tegangan Tarik Maksimum

Kriteria ini menganggap bahwa batuan mengalami karuntuhan oleh *fracture fragile (brittle)* yang diakibatkan oleh tarikan yang dikenakan pada batuan tersebut. Keadaan ini dapat disamakan dengan pengenaan tegangan utama  $-\sigma_3$  yang besarnya sama dengan kuat tarik uniaksial ( $\sigma_T$ ) batuan.

$$\sigma_3 = -\sigma_{ult} \dots\dots\dots 2.15$$

### 2.3.4 Kriteria Tegangan Geser Maksimum

Kriteria keruntuhan Tresca berlaku untuk batuan isotrop dan ductile. Kriteria ini merupakan fungsi dari tegangan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$ . Menurut kriteria ini, batuan mengalami keruntuhan jika tegangan geser maksimum  $\tau_{\max}$  sama dengan kuat geser batuan  $S$ .

$$S = \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \dots\dots\dots 2.16$$

dimana  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$  adalah tegangan utama mayor dan tegangan utama minor, sedangkan tegangan utama intermediate tidak berperan di dalam kriteria ini.

## 2.4 Klasifikasi Teknis Massa Batuan

Pada pekerjaan konstruksi tambang atau terowongan, persoalan mekanika akan dihadapkan pada hal-hal yang menyangkut :

- Kekuatan batuan
- Kestabilan/kemantapan

Pada umumnya batuan dianggap mempunyai kekuatan yang lebih tinggi daripada tanah. Namun, walaupun batuan mempunyai kekuatan yang tinggi, biasanya tidak dalam keadaan kontinu, sehingga massa batuan tidak bersifat isotrop. Pada bidang-bidang lemah seperti bidang perlapisan, bidang ketidakselarasan, bidang sesar, bidang kekar dan rekahan-rekahan lain kekuatan batuan dapat menjadi sangat rendah (Made Astawa Rai, 1989).

Adanya bidang diskontinu ini akan menyebabkan distribusi tegangan dalam massa batuan tidak disebarkan secara merata kesegala arah. Penilaian yang tepat terhadap sifat massa batuan akan sangat berguna dalam proses perencanaan /desain terowongan atau tambang. Klasifikasi massa batuan digunakan untuk melakukan penilaian atau pembobotan kekuatan massa batuan.

## 2.5 Desain Penyangga

### 2.5.1 Stabilitas blok dengan *bolt* (angkur)

Diasumsikan bahwa blok terbentuk oleh dua retakan pada samping galeri dengan sudut  $\alpha$  terhadap bidang horisontal. Berat blok adalah  $P$ . Jika gaya geser sepanjang permukaan retakan melebihi kuat geser, blok akan bergerak, sehingga blok akan runtuh.

$$T\alpha = P \sin \alpha \quad N\alpha = P \cos \alpha \quad \dots\dots\dots 2.17$$

$$R_s = N\alpha \tan \phi \quad \dots\dots\dots 2.18$$

$$= P \cos \alpha \tan \phi \quad \dots\dots\dots 2.19$$

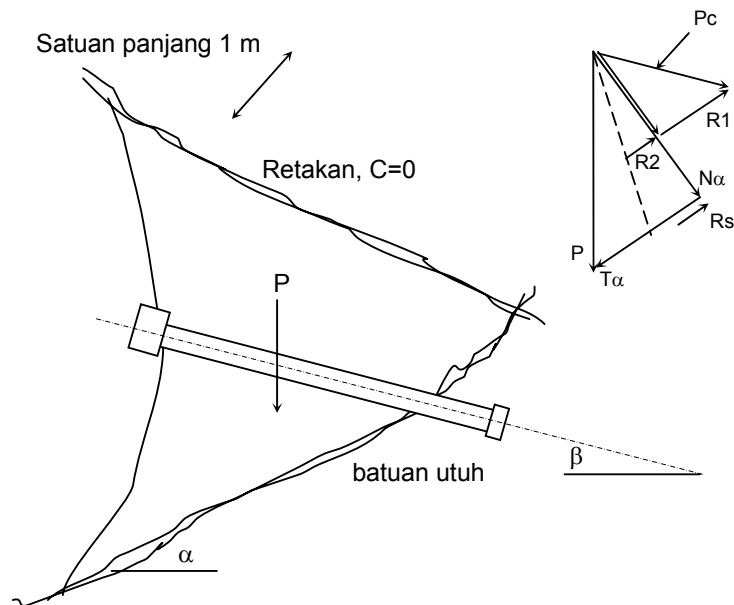
$$R_s \geq T\alpha \quad \dots\dots\dots 2.20$$

$$R_1 = P_c \cos \gamma = P_c \cos (\alpha + \beta) \quad \dots\dots\dots 2.21$$

$$R_2 = P_c \sin \gamma \tan \phi = P_c \sin (\alpha + \beta) \tan \phi \quad \dots\dots\dots 2.22$$

$$n = \frac{\Sigma R}{T\alpha} = \frac{R_s + R_1 + R_2}{T\alpha} \quad \dots\dots\dots 2.23$$

$$= \frac{P \cos \alpha \tan \phi + P (\cos (\alpha + \beta) + \sin (\alpha + \beta) \tan \phi)}{P \sin \alpha} \quad \dots\dots\dots 2.24$$



**Gambar 2.13 : Kapasitas angkur**

$$P_c = \frac{(n \sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi) P}{\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) \tan \varphi} \dots\dots\dots 2.25$$

dimana :

- P = berat sendiri blok (kg)
- $\alpha$  = sudut retakan terhadap bidang horisontal ( $^{\circ}$ )
- $\beta$  = sudut bolt terhadap bidang horisontal ( $^{\circ}$ )
- $\varphi$  = sudut geser pada permukaan retakan ( $^{\circ}$ )
- Rs = kuat geser (kg)
- Pc = gaya aksial bolt (kg)
- n = faktor keamanan
- $\Sigma R$  = jumlah gaya penahan runtuh (kg)
- $N\alpha$  = gaya normal pada retakan karena berat mati blok (kg)
- $T\alpha$  = gaya runtuh (kg)

Panjang *bolt* :      Atap kuat :  $l = 1/3 L$  .....2.26

                            Atap lemah :  $l = 1/2 L$  .....2.27



$$\text{Spasi bolt : } b = \frac{2}{3}l = \frac{2}{9}L \dots\dots\dots 2.28$$

$$l_{\text{maks}} = \frac{R_{\text{maks}}}{b^2 \cdot \gamma} \dots\dots\dots 2.29$$

dimana :

$b$  = spasi *bolt* (m)

$L$  = lebar galeri (m)

$l$  = panjang *bolt* (m)

$R_{\text{max}}$  = kapasitas maksimum *bolt*, kekuatan saat baja runtuh (ton)

$\gamma$  = berat isi batuan ( $\text{t/m}^3$ )

$$\text{Diameter bolt : } R_{\text{max}} = \sigma_{\alpha} F \dots\dots\dots 2.30$$

$$R = \frac{R_{\text{maks}}}{n} = \frac{0,785 \cdot d^2 \cdot \sigma_{\alpha}}{n} \dots\dots\dots 2.31$$

Dimana :

$R_{\text{max}}$  = kapasitas tarik maksimum *bolt* (kg)

$R$  = gaya aksial ijin (kg)

$n$  = faktor keamanan, 2-4

$\sigma_{\alpha}$  = kuat runtuh baja ( $\text{kg/cm}^2$ )

$F$  = luas *bolt* ( $\text{cm}^2$ )

$d$  = diameter *bolt* (cm)

### 2.5.2 Shotcrete

*Shotcrete* atau beton tembak didefinisikan sebagai beton atau adukan semen yang dilewatkan pada peralatan penyemprot (umumnya disebut 'gun') dan ditembakkan pada kecepatan tinggi pada permukaan dinding (umumnya terowongan). Adukan yang relatif kering umumnya digunakan, sehingga beton mampu menyangga berat sendirinya bahkan pada aplikasi vertikal (Birön and Arioğlu, 1983).

Untuk keperluan desain shotcrete, digunakan rumus :

$$t = 0,434 \frac{Pr}{\tau} \dots\dots\dots 2.32$$

dimana :

t = tebal *shotcrete* (m)

P = tegangan pada *shotcrete* (t/m<sup>2</sup>)

r = radius galeri (m)

τ = tegangan geser ijin *shotcrete* (t/m<sup>2</sup>)